

新ニュートリノ検出器水モジュールの開発・製作と 飛跡再構成におけるビームモニター 鉄モジュールとの整合性

大阪市立大学
前期博士課程2年
原田 潤

2017年2月21日
ICEPP symposium

概要

- T2K実験 と WAGASCI実験
- 水モジュール : INGRID Water Module 検出器
- 宇宙線を用いたINGRID Water Module の光量測定
- INGRID Water Module と 鉄モジュール INGRID のトラックマッチング
- まとめ

T2K 実験と WAGASCI (Water Grid And SCIntillator) 実験

- Tokai to Kamioka
- 長基線ニュートリノ振動実験

<T2K実験の目的>

1. ニュートリノ振動パラメータの精密測定
2. ニュートリノにおけるCP対称性の破れの探索

Super Kamiokande

Near Detector

J-PARC

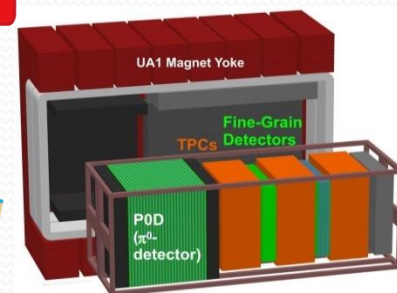
Mt. Ikeno-Yama
1360 m

Mt. Noguchi-Goro
2924 m

water equiv. ↑ 1700 m

Neutrino beam

295 km



SK

標的 : 水 (H₂O)

アクセプタンス : 4π

ND₂₈₀

標的 : 主にプラスチック (CH)

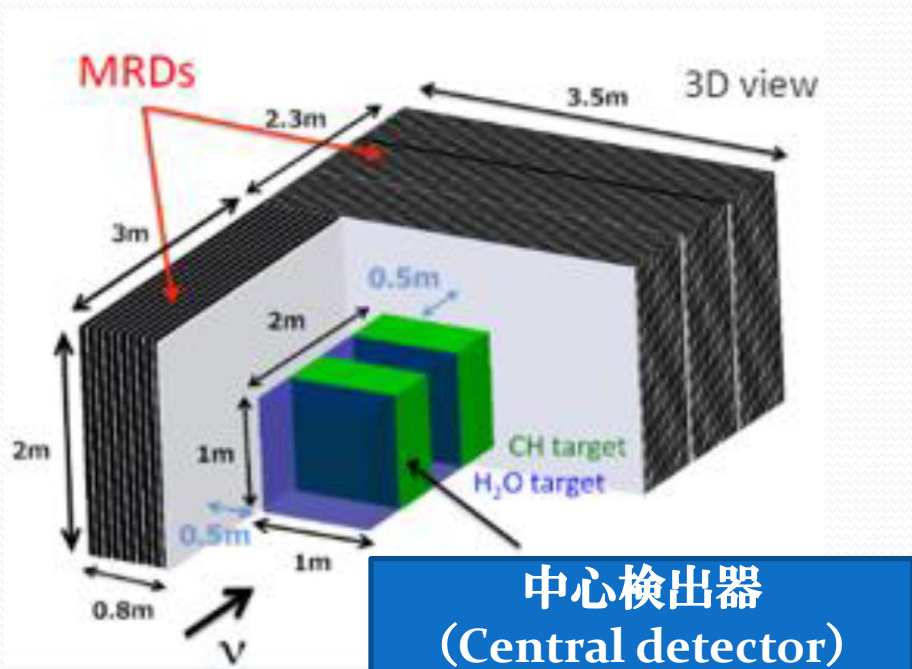
アクセプタンス : 前方散乱

- 二つの検出器の標的原子核の違いがニュートリノ振動解析における系統誤差の原因となっている
- 新しい検出器を製作し、水とプラスチックのニュートリノ反応断面積比を3%の精度で測定することで、この系統誤差を抑制する

⇒WAGASCI 実験

WAGASCI 検出器

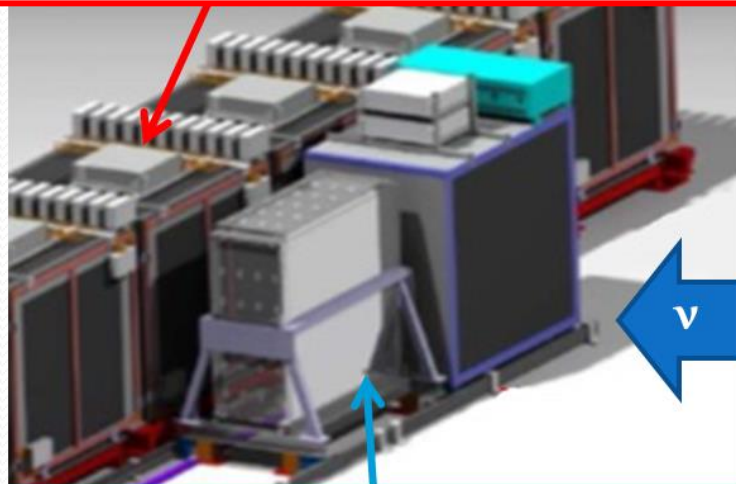
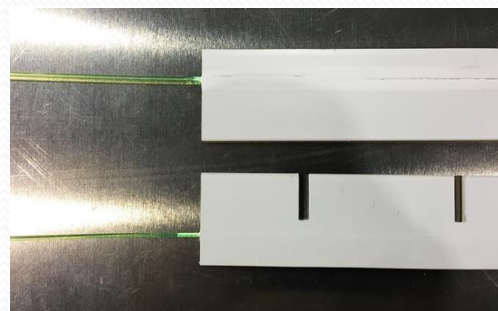
中心検出器 (Central detector) + μ 飛程検出器 (MRD)



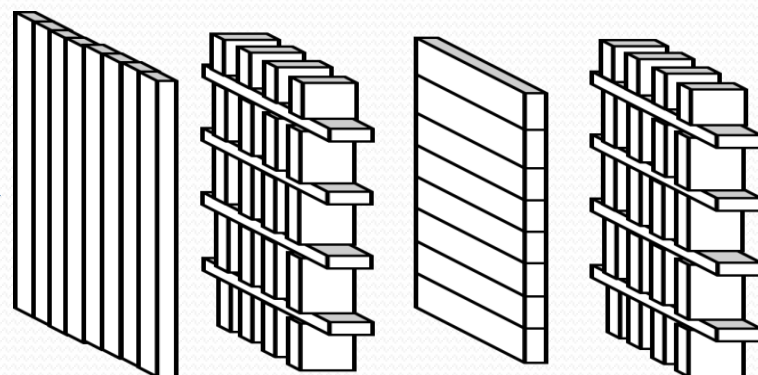
- 中心検出器 (Central detector)
= 水モジュール (H₂O標的) 2台
+ CHモジュール (CH標的) 2台
を交互に並べている
- MRDはミューオンの飛跡再構成と
運動量の測定を行う

水モジュール : INGRID Water Module 検出器

- INGRID : 既存のビームモニター (鉄とプラスチックのサンドウィッチ構造)

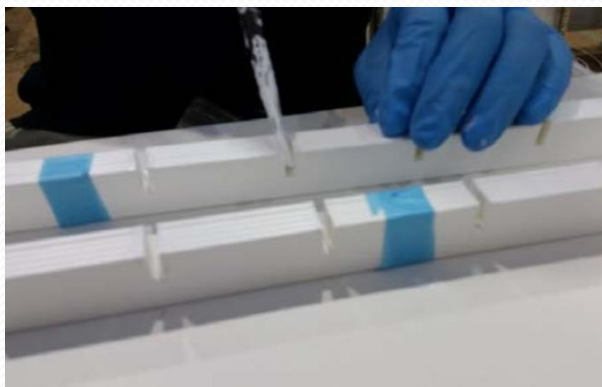


INGRID Water Module (H₂O標的)



- WAGASCI検出器の水モジュールをINGRIDの前に設置したもの
- 合計1280本のプラスチックシンチレータ (w/o slit , w/ slit 640本ずつ)
- シンチレータは3 mmの薄さで、検出器の体積のうち8割が水標的である
- w/o slit シンチレータ層 と w/ slit シンチレータをgrid状にした層を交互に並べている

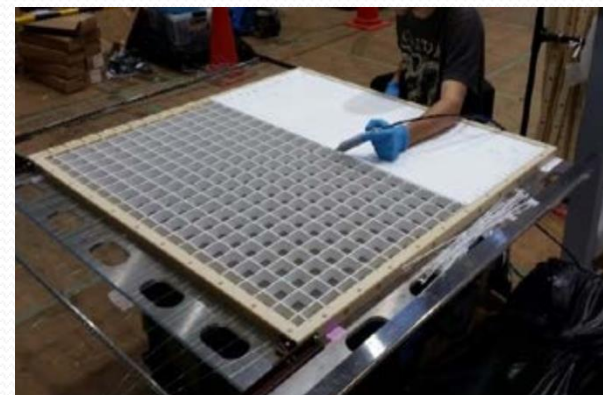
INGRID Water Module の製作 (2015年10月～2016年3月)



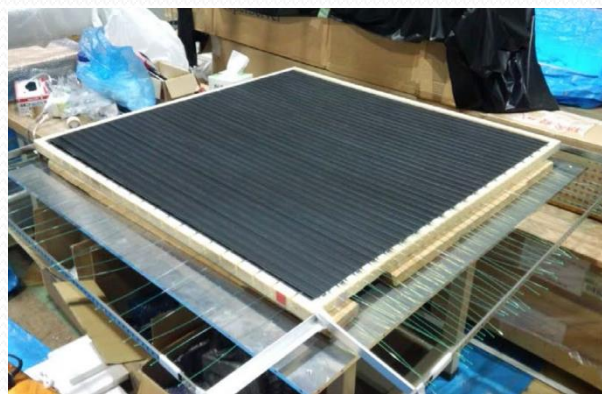
反射材塗布



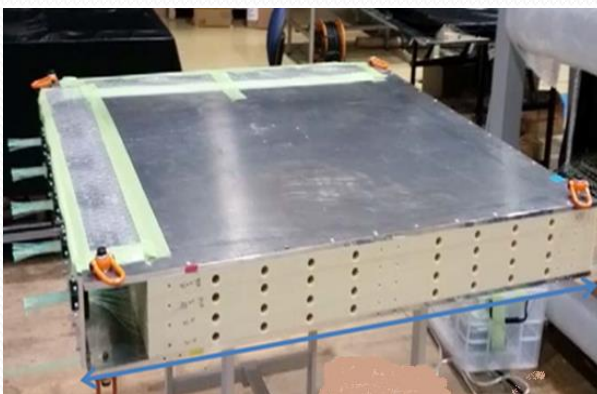
シンチレータ-ファイバー
接着



レイヤー組み上げ



黒塗料塗布
→ レイヤーの完成



4つのレイヤーを組み上げ
Sub moduleを製作

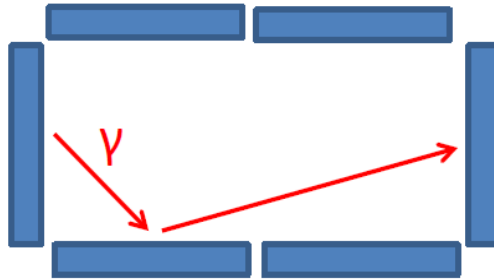


4つのSub moduleを
水槽にインストール

黒塗料塗布の理由

- 組み上げたSub Module1台を宇宙線で光量試験
→シンチレータから漏れたシンチレーション光が格子内で乱反射し、シンチレータ間のクロストークとなる

side view of
scintillator layer

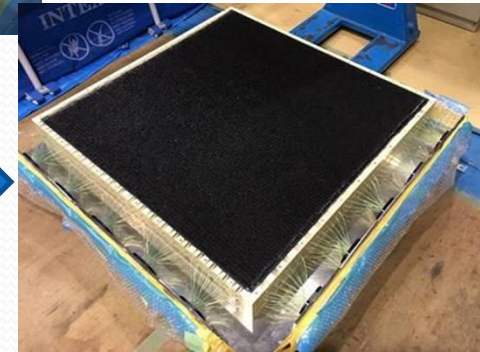


シンチレータ

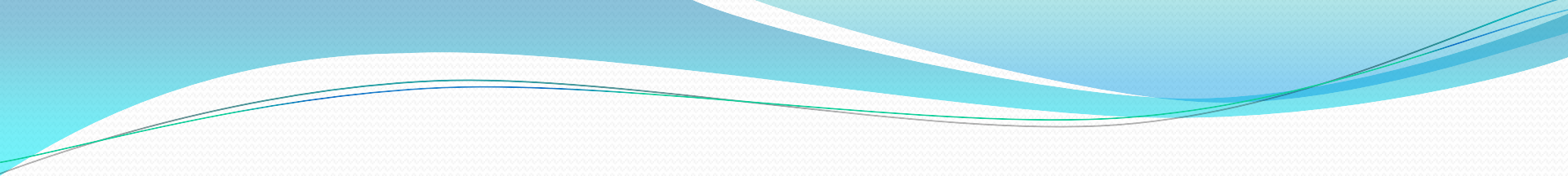


- 1台目のSub Moduleはレイヤーに分解出来ず
⇒ブラックシートをレイヤー間に挟むのみ

- 2台目以降
⇒レイヤー毎に黒塗料の塗布を行い、ブラックシートも挟む



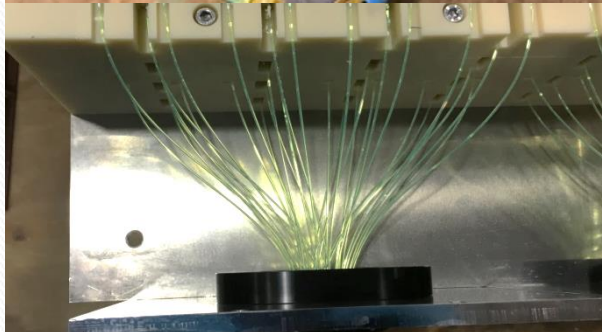
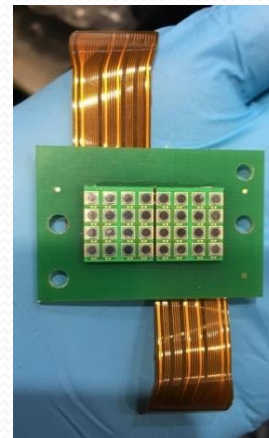
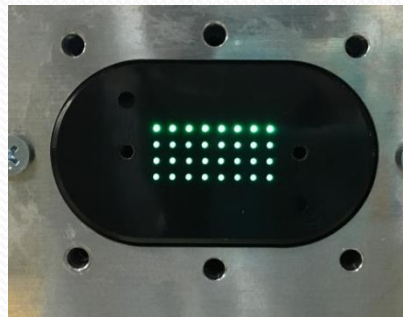
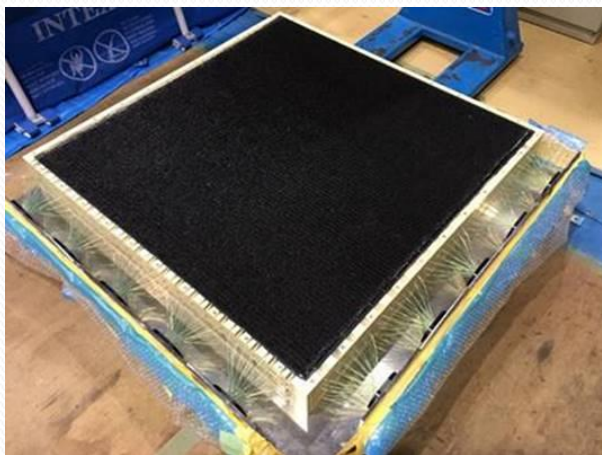
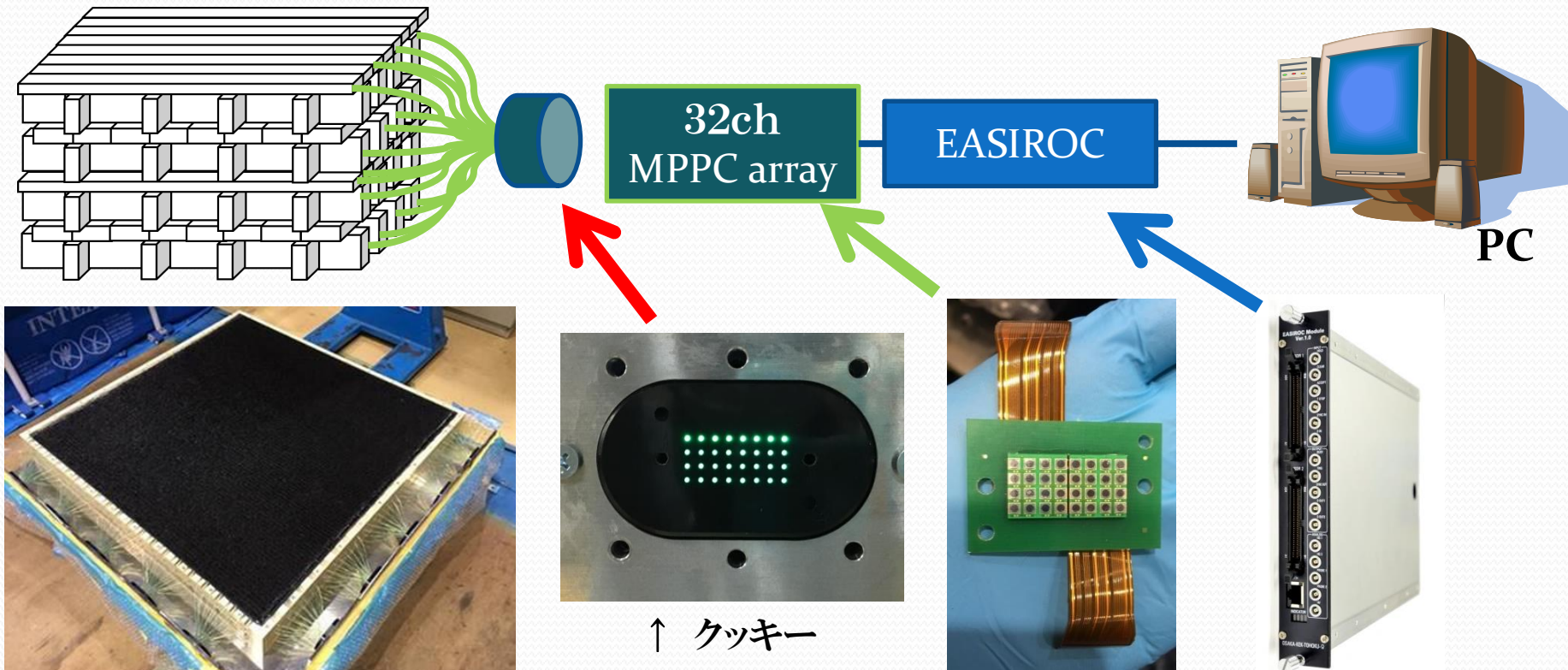
↑ 黒塗料スプレー とブラックシート



宇宙線を用いた INGRID Water Module の 光量測定

INGRID Water Module の 光量測定

<Set up>



- ファイバーを32本毎に束ねて、32 ch Array 型のMPPCを用いる
- EASIROCはMPPC出力をトリガーにして、ADC 取得を行う

宇宙線を用いたINGRID Water Module の 光量測定

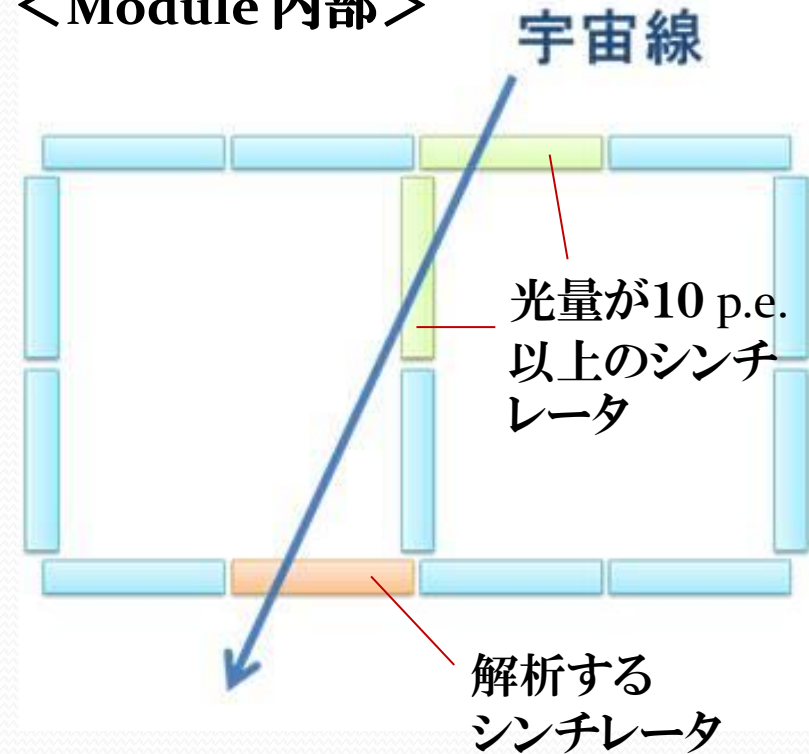
◎測定方法

- 測定試料数 = 1280 ch (64ch / 1 測定)
- 取得イベント数 = 0.5M events/ 1 測定
- セルフトリガー
(64 ch OR トリガー, $V_{th} = 7.2$ p.e.)

◎解析方法

- 解析するシンチレータ以外で少なくとも一つの光量が10 p.e.以上であることを要求

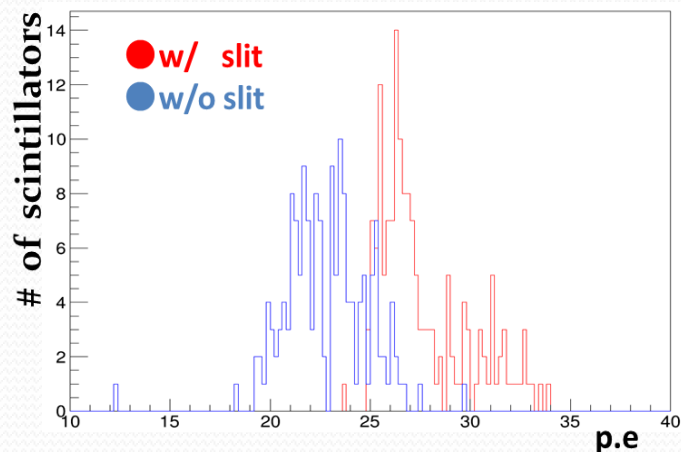
<Module 内部>



測定結果

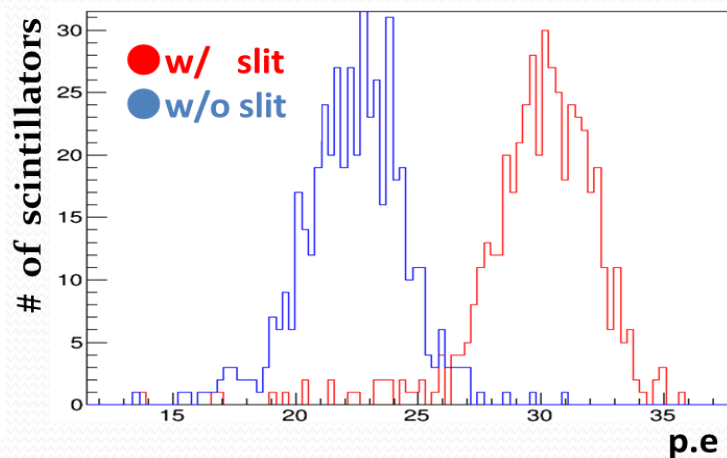
<1台目のSub Module>

→ ブラックシートのみ



<2~4台目のSub Module>

→ ブラックシート + 黒塗料

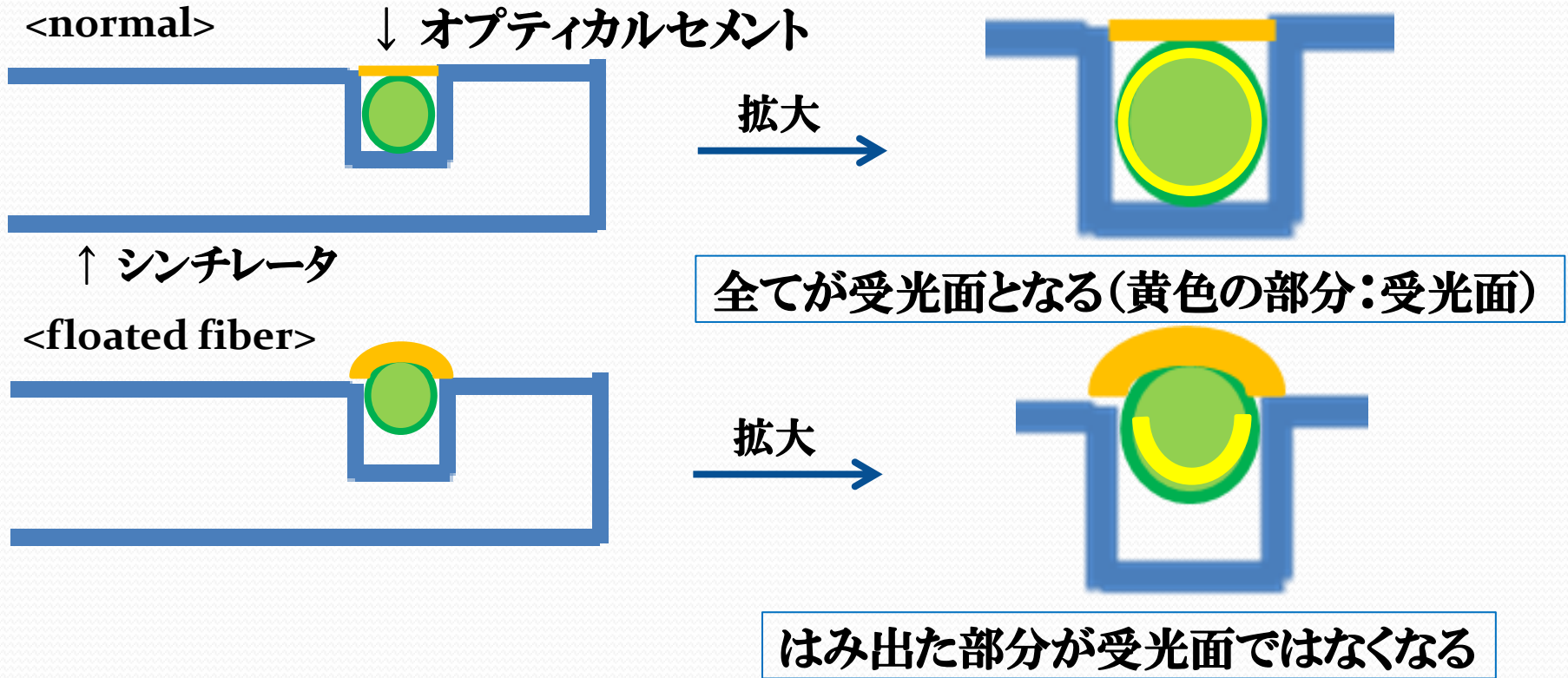


scintillator type	p.e. (mean)	RMS
w/ slit	27.6	2.3
w/o slit	22.8	2.1

scintillator type	p.e. (mean)	RMS
w/ slit	29.5	3.0
w/o slit	22.7	2.7

- 1280 chの光量測定 (Sub Module1台につき320 ch)
 - 平均光量は20 p.e.を越える十分な光量
 - ばらつきは10%程度
- ⇒ ばらつきの原因
1. シンチレータの個体差 …… 10%
 2. ファイバーの研磨による揺らぎ …… 5%
- 低い光量のシンチレータも確認

低い光量の原因考察

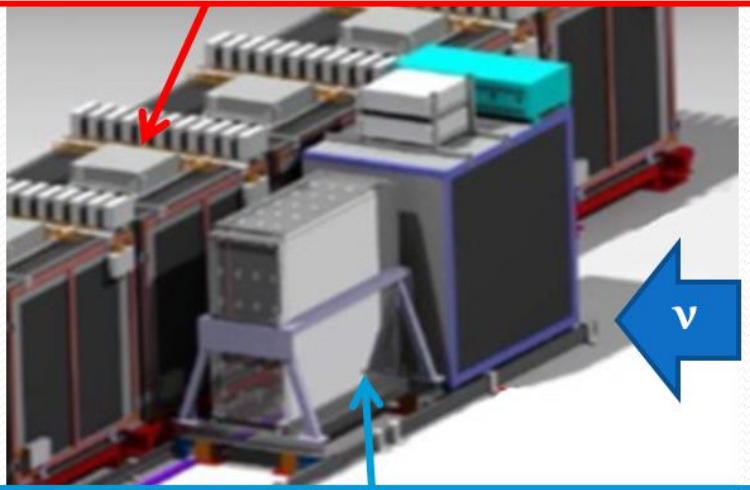


- ・ シンチレータとファイバーの接着作業において
シンチレータからのファイバーの浮きが光量を低くしている

INGRID Water Module と INGRIDの トラックマッチング

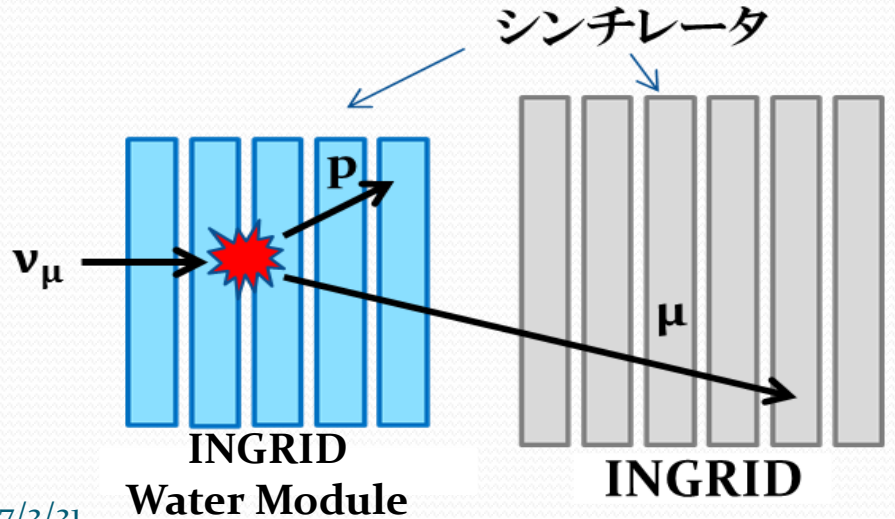
INGRID Water Module の性能評価

• INGRID : 既存のビームモニター
(鉄とプラスチックのサンドウィッチ構造)



INGRID Water Module (H₂O標的)

<設置場所>
• INGRIDよりもビームの上流部
⇒ 単体で粒子識別ができないため、
INGRID Water Module内において
ニュートリノ反応によって生成された
ミューオンのうち、INGRIDを通っ
たデータを集める



INGRID Water Module と INGRID の
トラックマッチングを確認する必要がある

トラックマッチングの確認方法

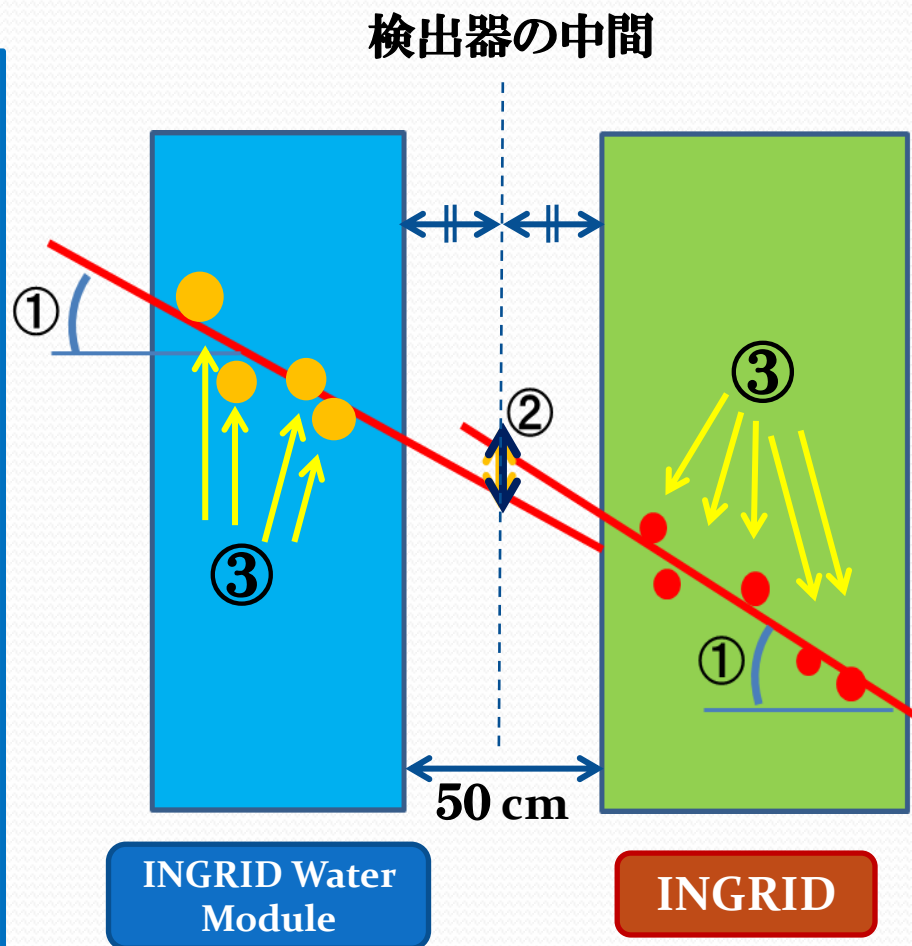
- 各検出器で、ヒット情報をもとに飛跡を再構成し、以下の内容を調べる

① 飛跡の傾きの差

② 二直線の距離

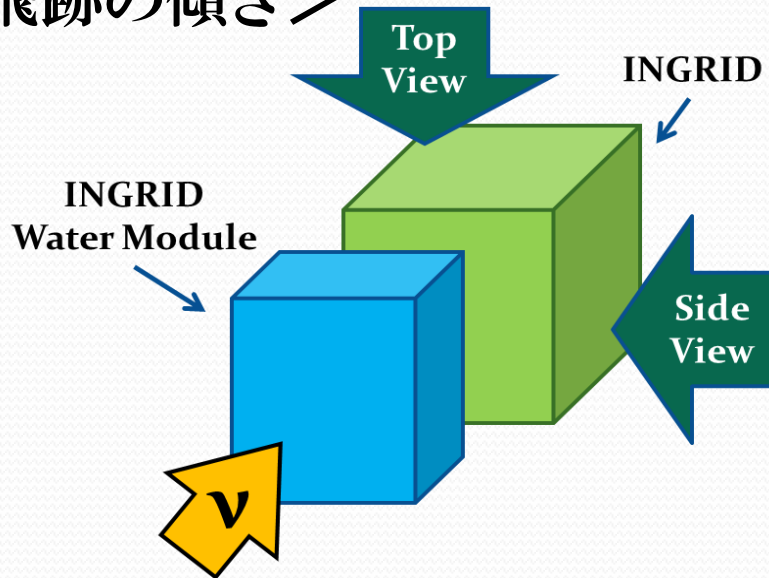
③ トラックのヒットの平均時間の差
(飛跡に関するヒットの時間の平均)

- 今回は15時間(15200 events)の宇宙線データを使用



測定結果

<飛跡の傾き>



<Top>

平均値とその誤差

$$0.49 \pm 0.30 \text{ [degree]}$$

誤差の範囲内(2 σ 程度)で一致

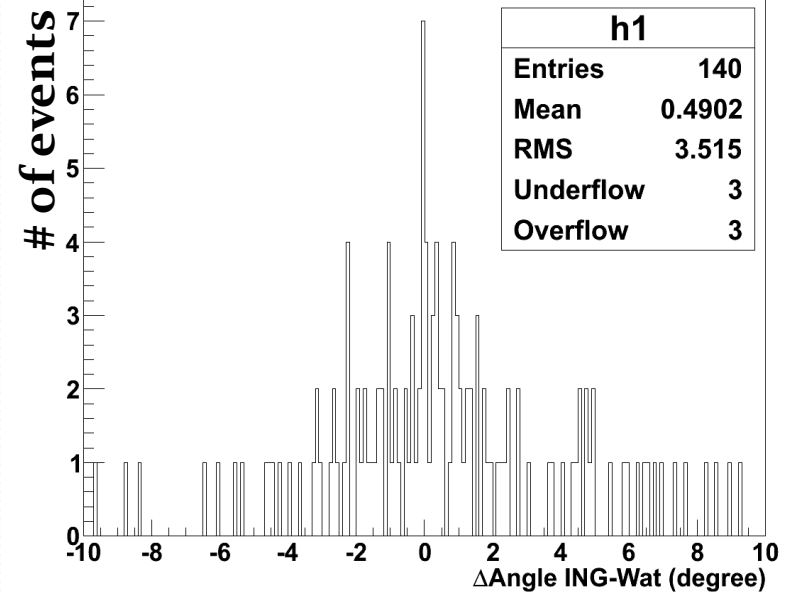
<Side>

平均値とその誤差

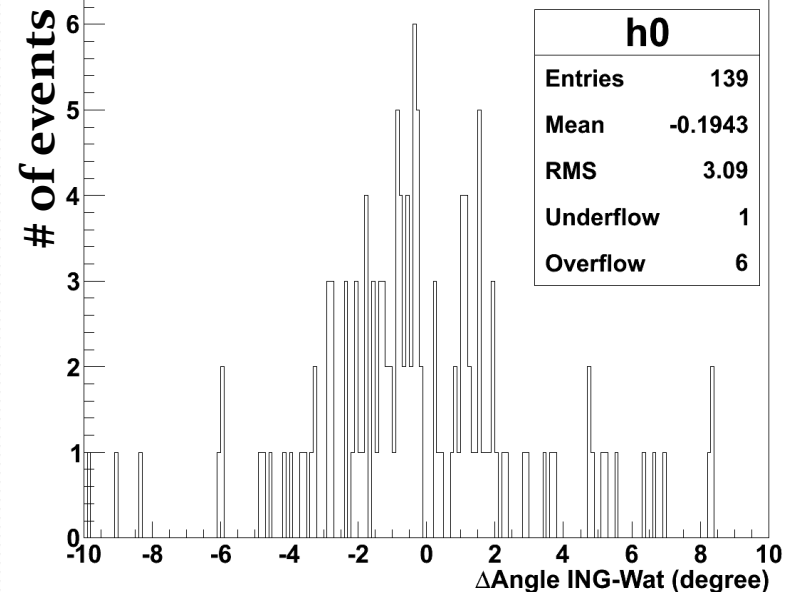
$$-0.19 \pm 0.27 \text{ [degree]}$$

誤差の範囲内(1 σ 程度)で一致

Top



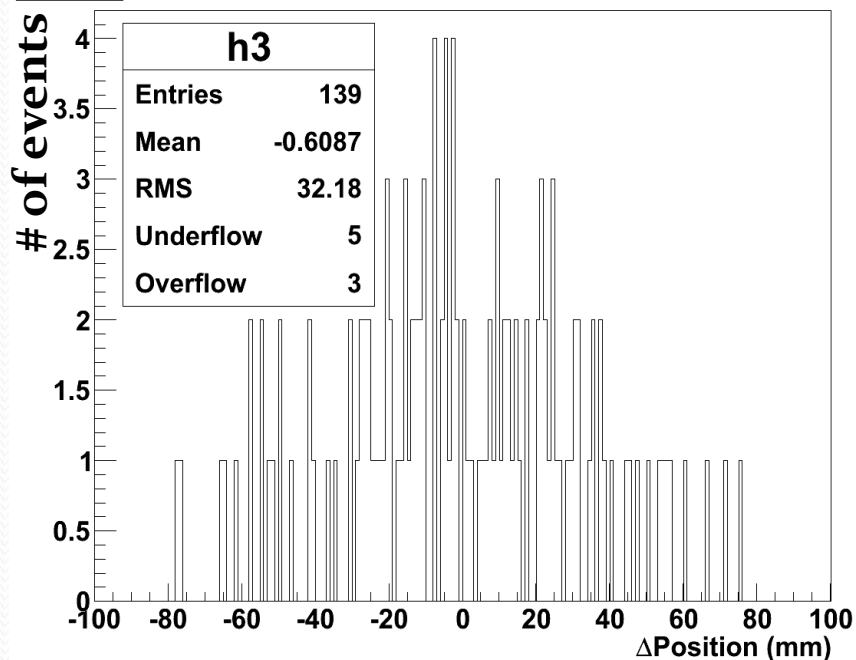
Side



測定結果

〈二直線の距離〉

Side



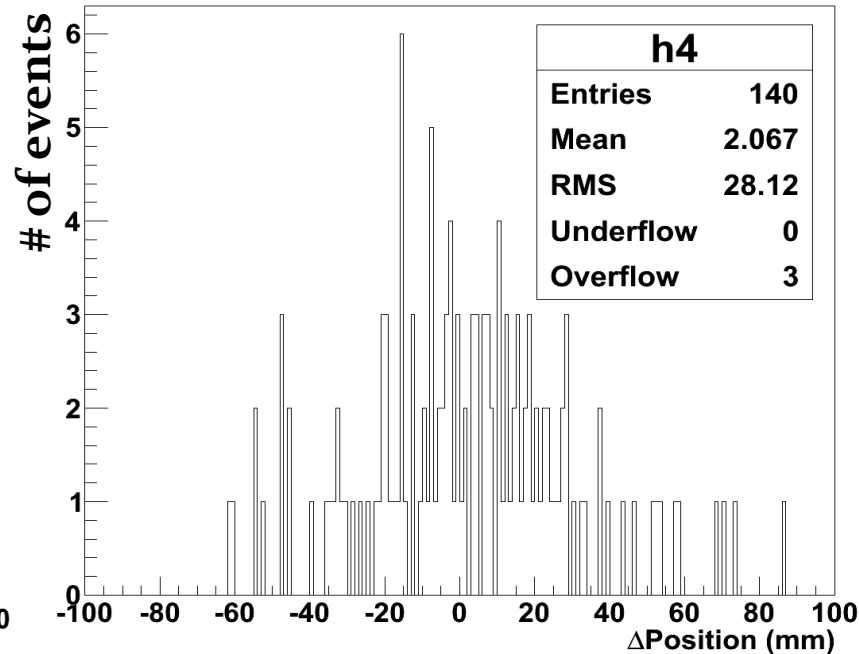
〈Side〉

平均値とその誤差

$$-0.6 \pm 2.8 \text{ [mm]}$$

誤差の範囲内(1σ程度)で一致

Top



〈Top〉

平均値とその誤差

$$2.1 \pm 2.4 \text{ [mm]}$$

誤差の範囲内(1σ程度)で一致

測定結果

<トラックのヒット時間>

◎平均とその誤差は

$$16.8 \pm 0.9 \text{ [ns]}$$

・ INGRIDにつないでいるケーブルの方が10 m 短い

⇒ INGRIDのヒット時間が50 ns 早くなる

・ 二つの検出器の距離は約1.2 m
μはINGRIDを4~5 ns 後に通過

※ 約 -45 nsになるはずが、大きい値になった

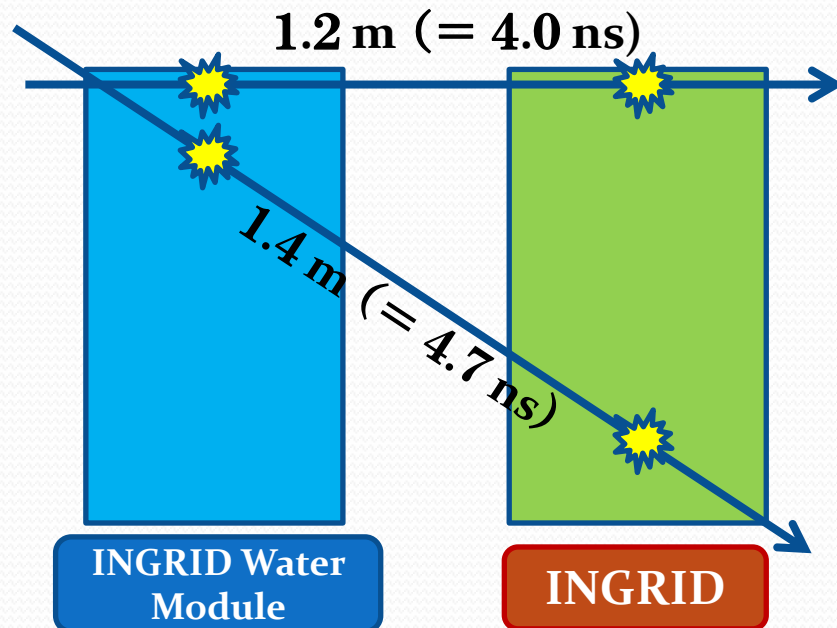
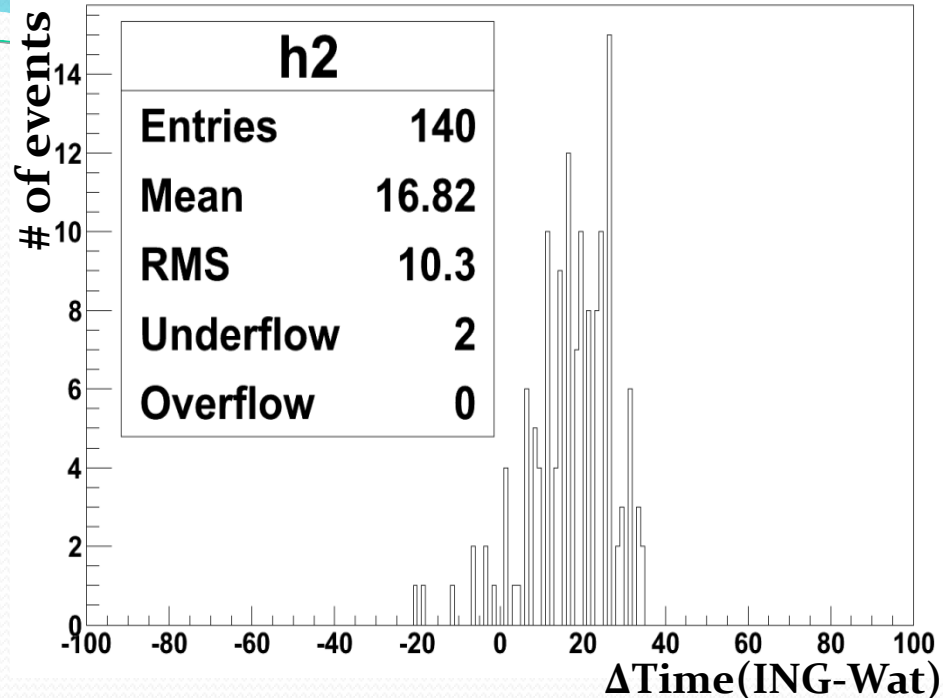
→ エレキ関係での影響
(channel毎に異なるオフセットなど)

◎ばらつきが大きい (60%)

宇宙線の入射角度によって

ヒット時間は最大 18%の変化

ΔTime (ING-Wat)



まとめと今後

<INGRID Water Moduleの性能評価>

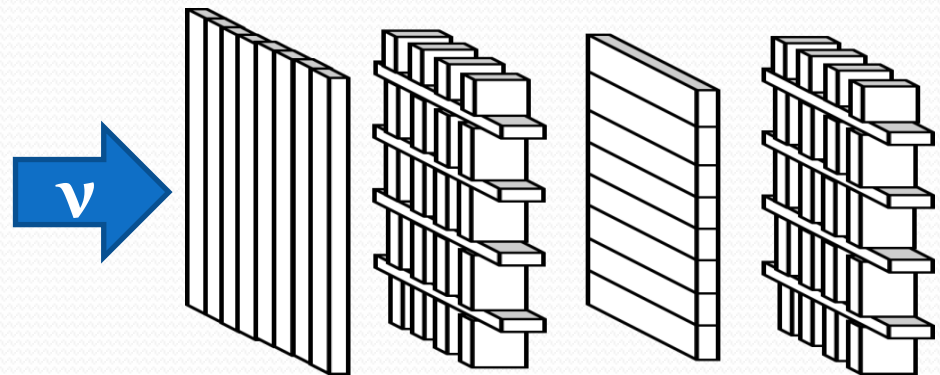
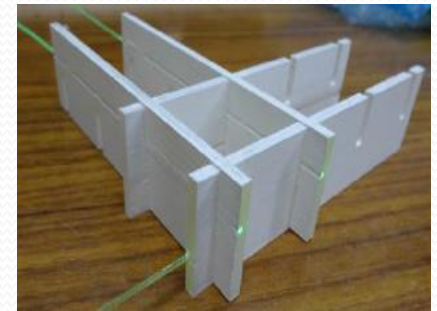
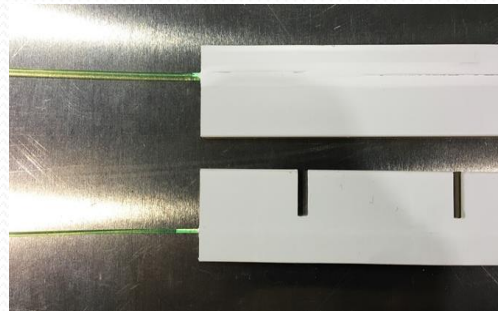
- ◎全1280chの光量測定を行い、20 p.e.を超える平均光量を10%のばらつきで確認できた
- ◎平均光量を下げる主な原因は接着時のシンチレータからのファイバー浮きであるとわかった

<INGRID Water ModuleとINGRID のトラックマッチング>

- ◎INGRID Water ModuleとINGRID を通る宇宙線を用いてトラックマッチングを調べた結果、角度、位置は平均的にずれは無かったが、ヒット時間のずれを確認した
- ◎ヒット時間のずれの原因を特定し、補正する

Back Up

INGRID Water Module

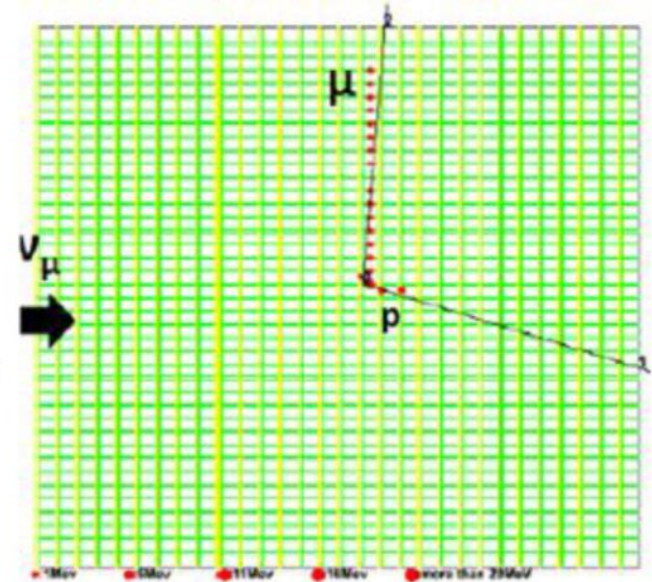
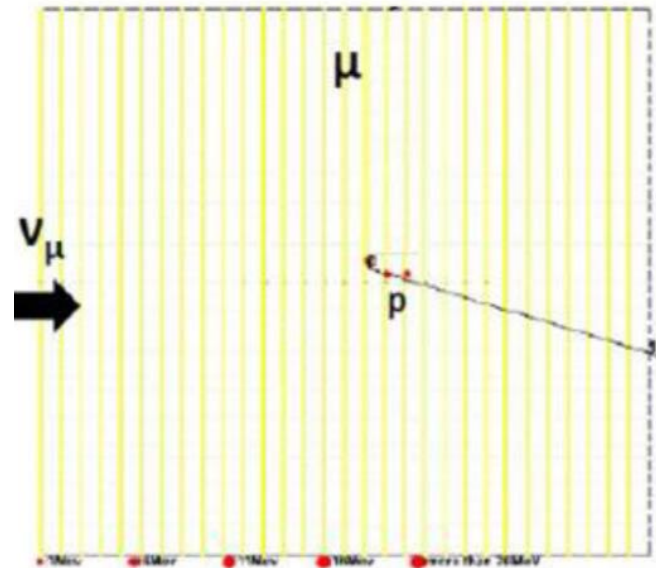
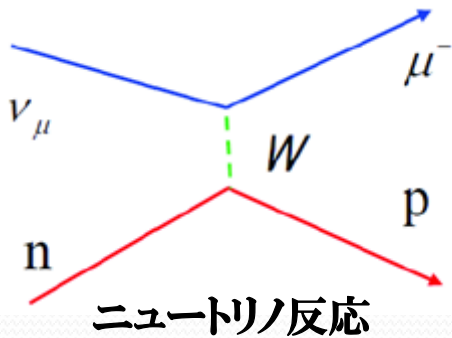


- 合計1280本のプラスチックシンチレータ（w/o slit , w/ slit 640本ずつ）
 - シンチレータは3mmの厚さで、検出器の体積のうち8割が水標的である
 - w/o slit シンチレータ層 と w/ slit シンチレータをgrid状にした層を交互に並べることで、3次元格子構造をつくる
- 4π のアクセプタンスを実現し、大角度方向の飛跡も再構成できる

INGRID Water Module

< w/o grid layer >

< w/ grid layer >



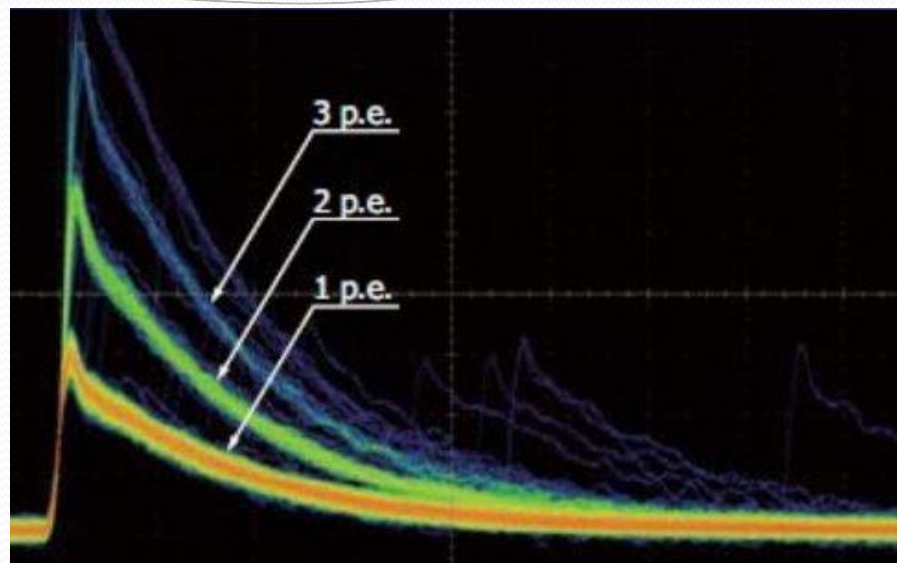
- 合計1280本のプラスチックシンチレータ (w/o slit , w/ slit 640本ずつ)
 - シンチレータは3mmの厚さで、検出器の体積のうち8割が水標的である
 - w/o slit シンチレータ層 と w/ slit シンチレータをgrid状にした層を交互に並べることで、3次元格子構造をつくる
- 4πのアクセプタンスを実現し、大角度方向の飛跡も再構成できる

INGRID Water Module の 光量測定

<MPPC array>

<MPPCとは>

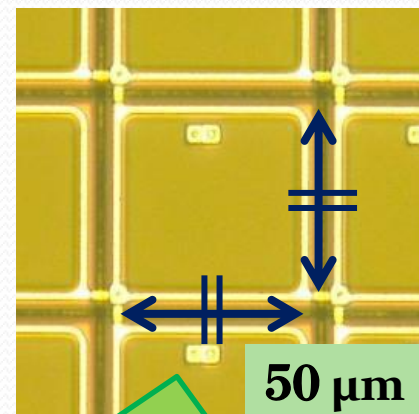
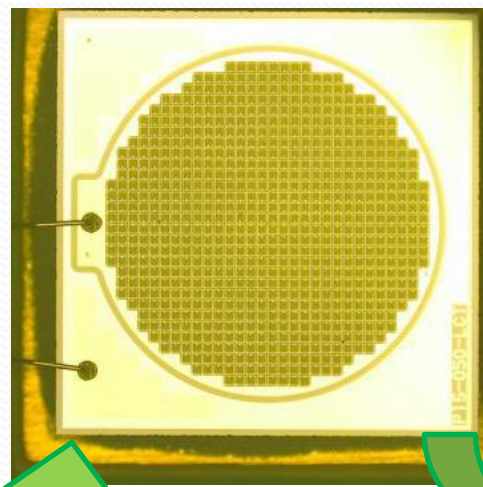
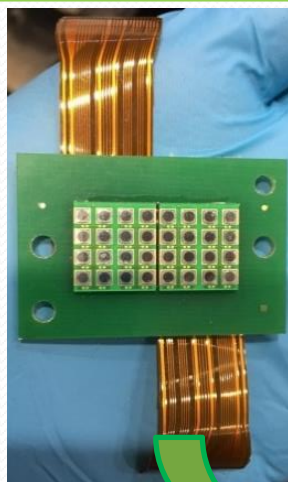
- ガイガーモードAPD(Avalanche Photodiode)をマルチピクセル化した光検出器
- 各ピクセルがパルスを出力
- p.e.(photon equivalent)は光子が入射したピクセル数を示す単位
- 複数のピクセルが出力したパルスは重ね合わさって出力



↑ オシロスコープで見たMPPCの出力波形

<MPPC array>

- 浜松ホトニクス製の新型MPPC
- 4×8 (計32 ch)に並べられたMPPC



×100

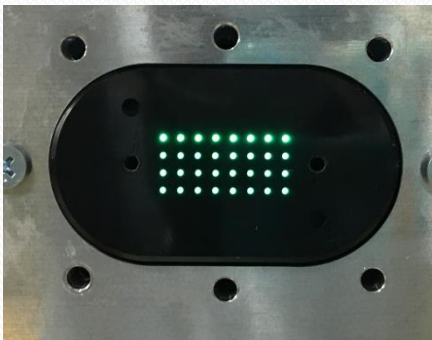
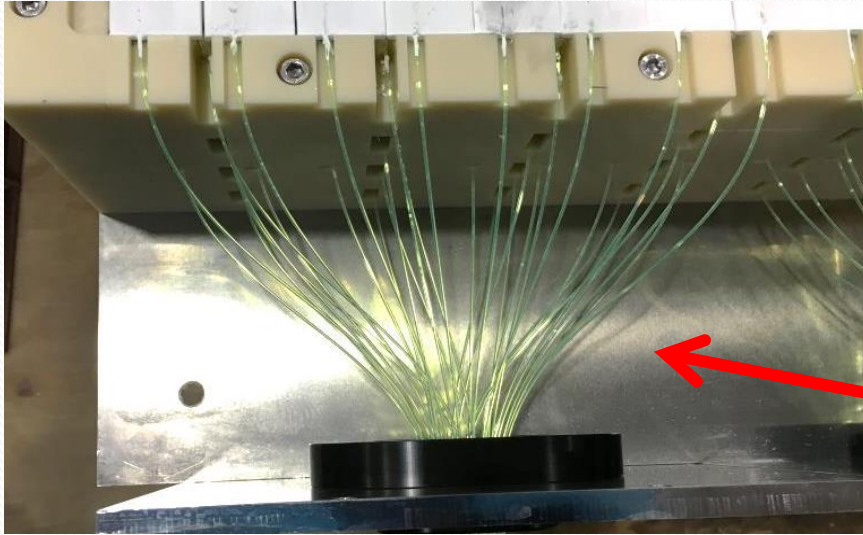
•716ピクセル
•直径 1.5 mm

×100

23

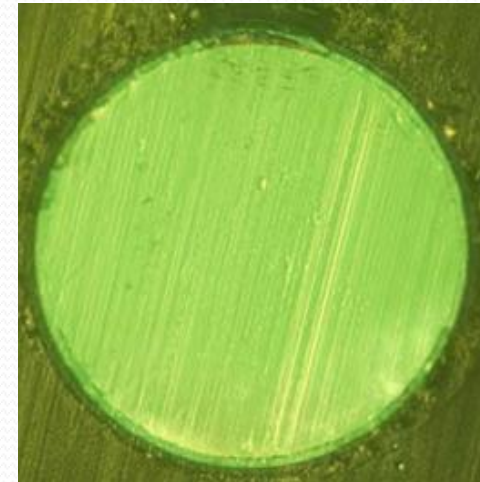
INGRID Water Module の 光量測定

<クッキー>



↑ クッキー
32(4×8)本

- クッキーはファイバーを32本毎に束ねている
- Sub Moduleに10個のクッキーが付いている
- ファイバーの端面はダイヤモンドカッターで研磨している



ファイバー端面(×200)

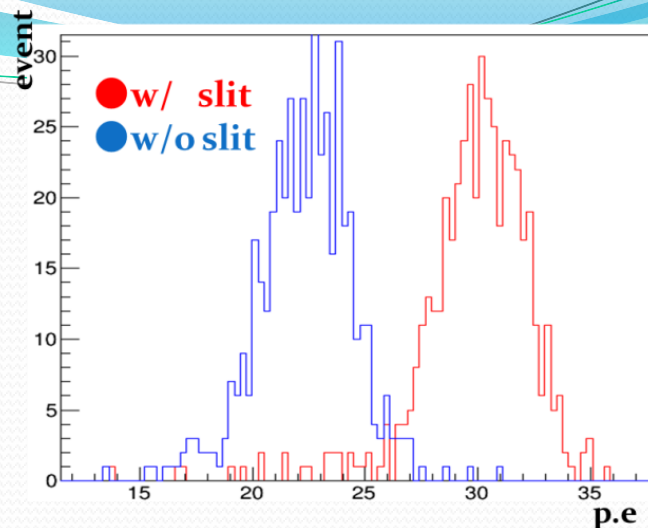
INGRID Water Module の 光量測定 <EASIROC>

- 64 chのMPPCの同時駆動
- 内部HV電源(0 ~ 90 V)
- 各ch のMPPCへの印加電圧を調節できる(0 ~ 4.5 V)
- MPPC出力を12 bit ADCで取得できる
- MPPC出力をトリガーにできる(しきい値も設定可能)

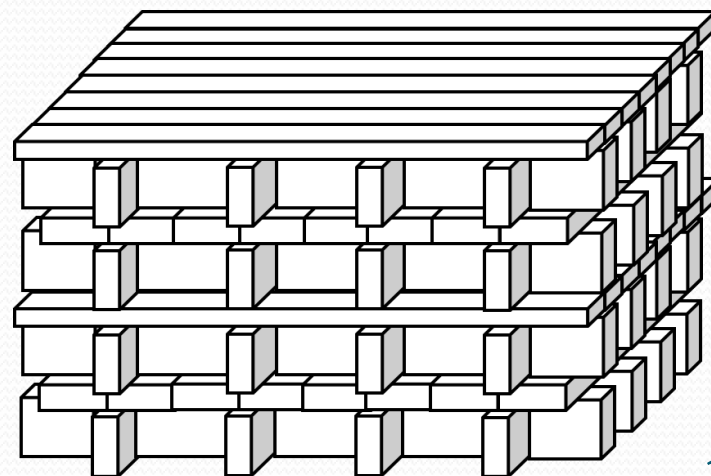
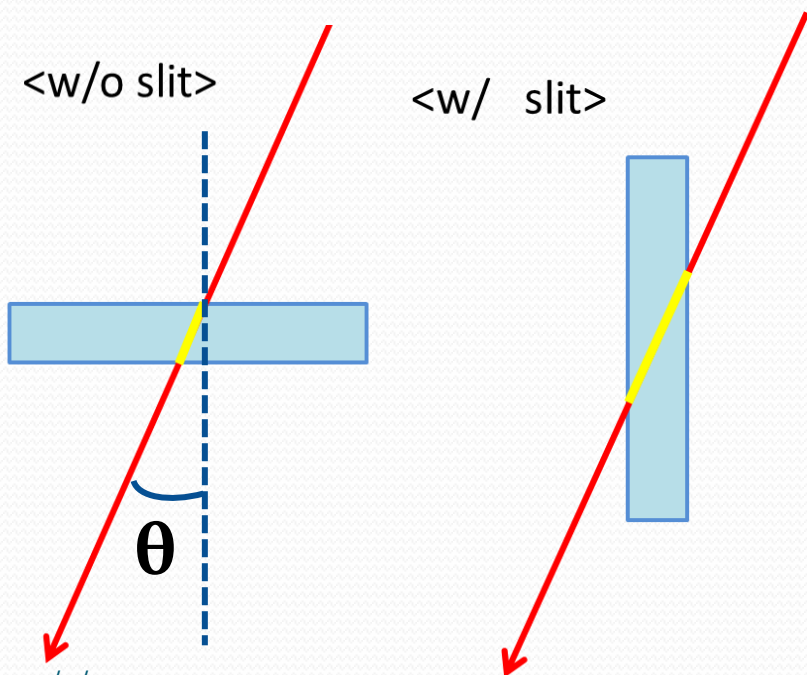


平均光量の差

- 角度 θ が小さいほど(鉛直上を0の時)
宇宙線(ミュオン)レートが大きい
→測定時の置き方により、
w/ slitの平均光量は大きくなる。



scintillator type	p.e. (mean)	RMS
w/ slit	29.5	3.0
w/o slit	22.7	2.7



INGRID Water Module の 光量測定

◎測定方法

- 取得イベント数 = 0.5M events/1 cycle
- 測定試料数 = 1280 ch (64ch /1 cycle)
- セルフトリガー
(64 ch ORトリガー, $V_{th} = 7.2$ p.e.)

◎解析方法

- 解析するシンチレータ以外で少なくとも一つの光量が10 p.e.以上を要求

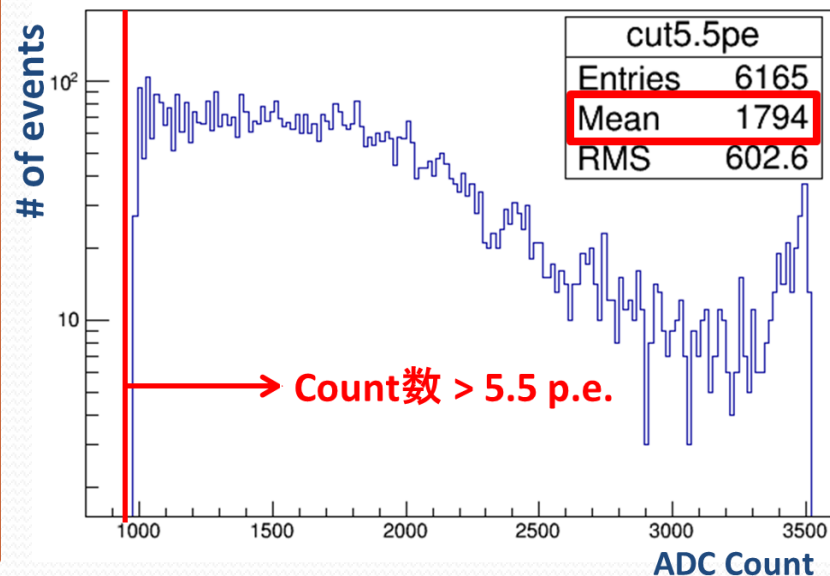
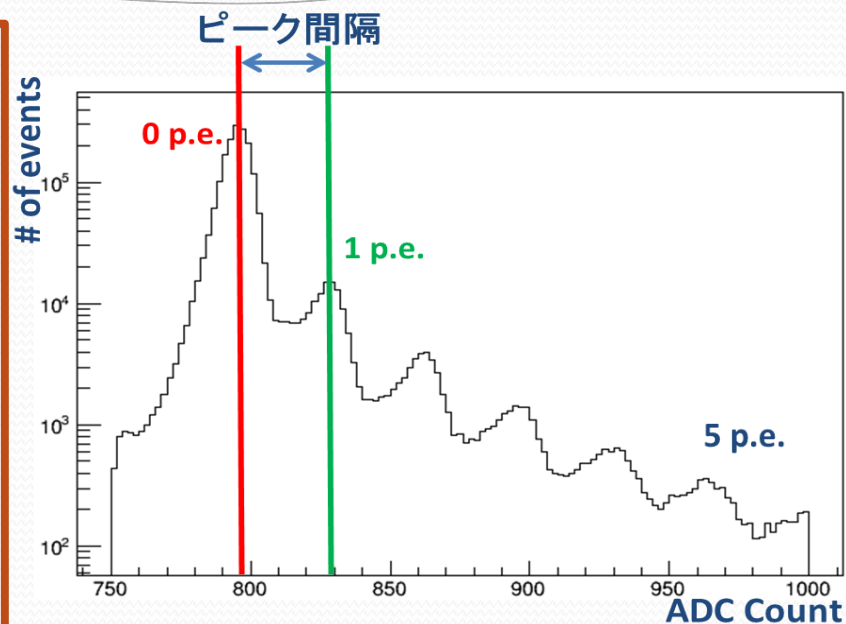
- 平均光量の求め方

$$\text{平均光量} = \frac{\text{mean} - \text{pedestal}}{\text{ピーク間隔}}$$

→ pedestal (0 p.e.), 1 p.e. の

ADC CountはPeakSearchをして求める

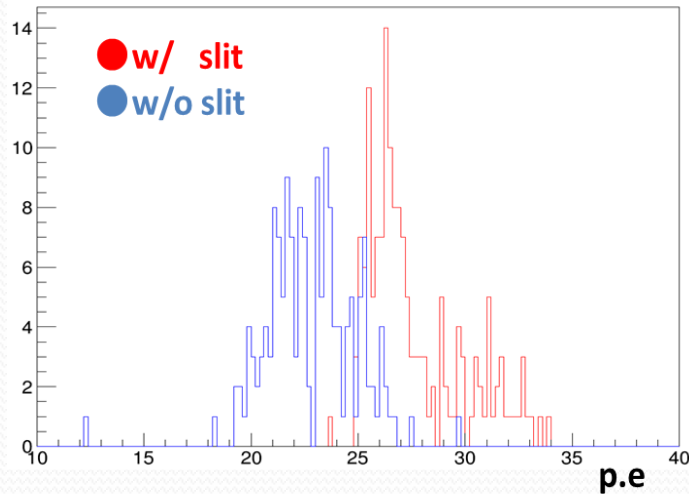
→ mean : Count数 > 5.5 p.e. の範囲



INGRID Water Module の 光量測定

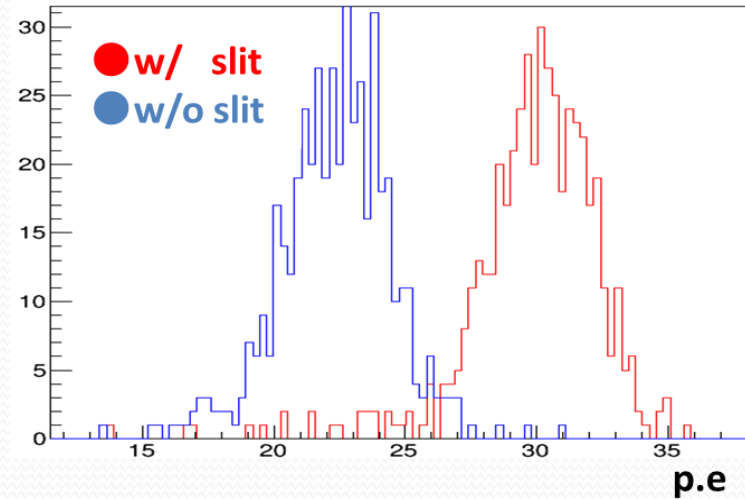
<1台目のSub Module>

→ ブラックシートのみ



<その他のSub Module>

→ ブラックシート + 黒塗料



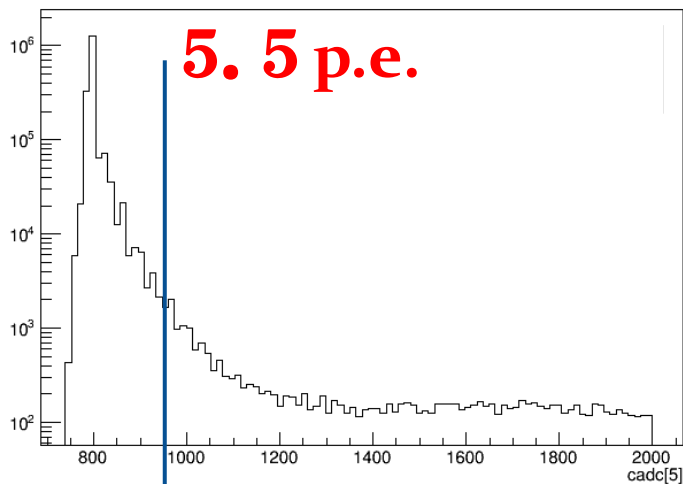
scintillator type	p.e. (mean)	RMS
w/ slit	27.6	2.3
w/o slit	22.8	2.1

scintillator type	p.e. (mean)	RMS
w/ slit	29.5	3.0
w/o slit	22.7	2.7

- w/o slit → 二つの結果に大きな変化はない
- w/ slit → **2 p.e.程度**の違いがある

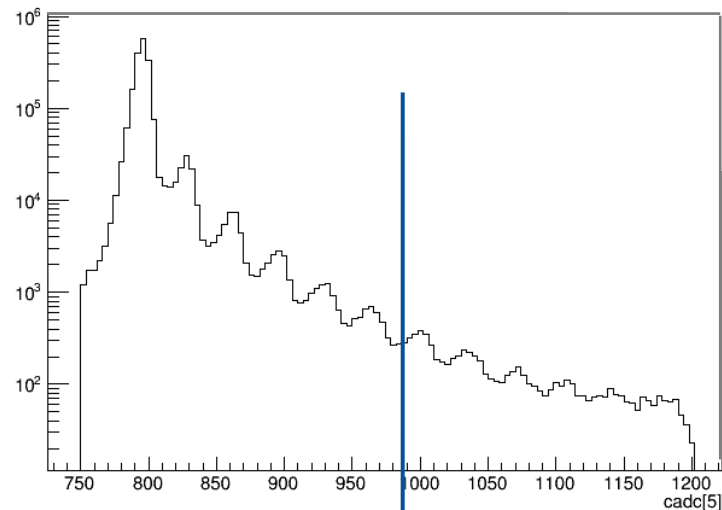
INGRID Water Module の 光量測定

cadc[5] {750<cadc[5]&&cadc[5]<2000}

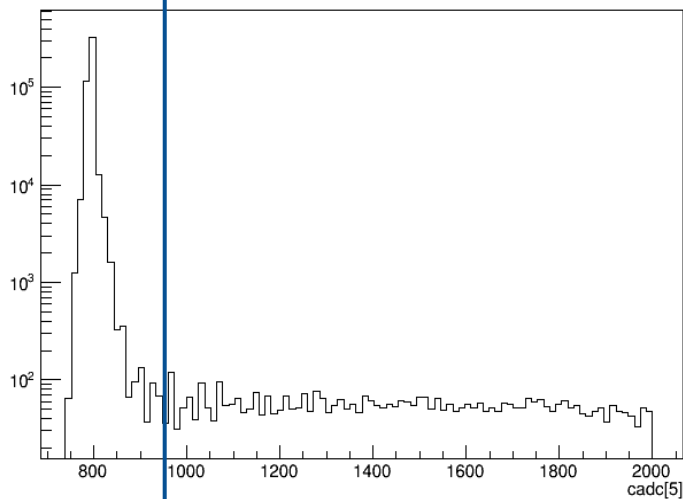


1台目
w/ slit

cadc[5] {750<cadc[5]&&cadc[5]<1200}



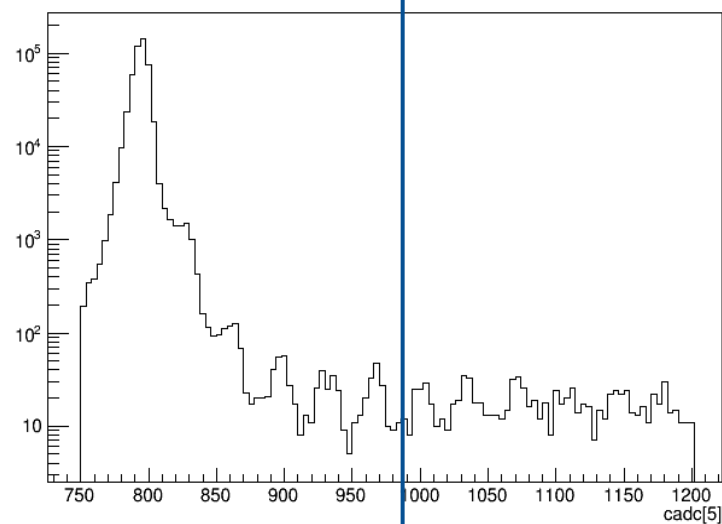
cadc[5] {750<cadc[5]&&cadc[5]<2000}



その他
w/ slit

cut

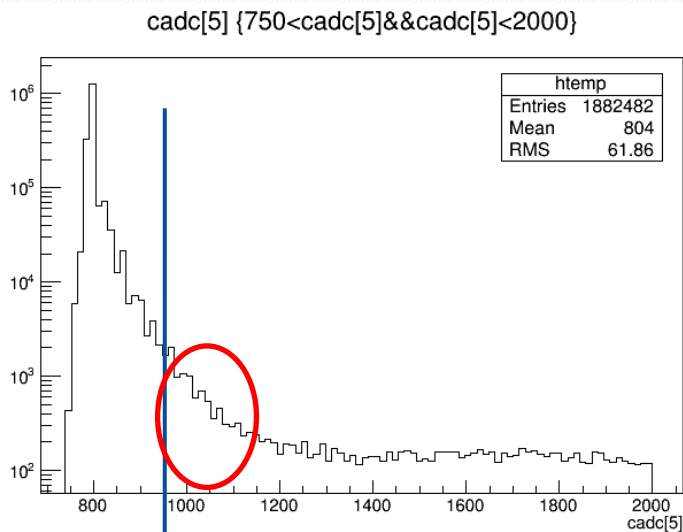
cadc[5] {750<cadc[5]&&cadc[5]<1200}



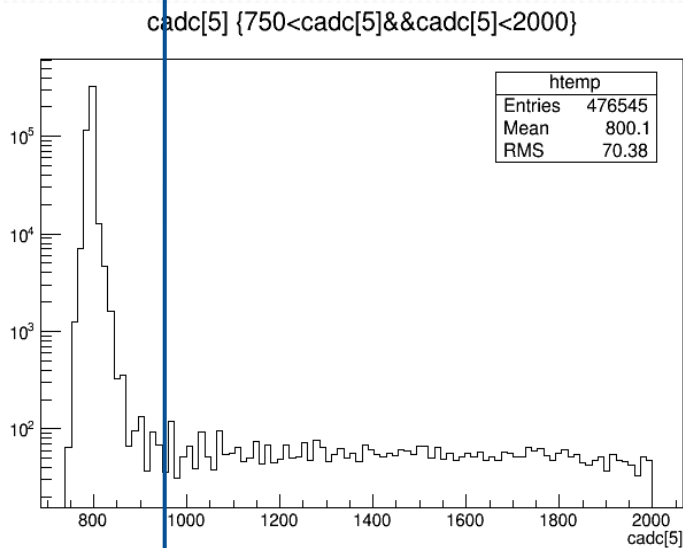
cut

INGRID Water Module の 光量測定

1台目
w/ slit



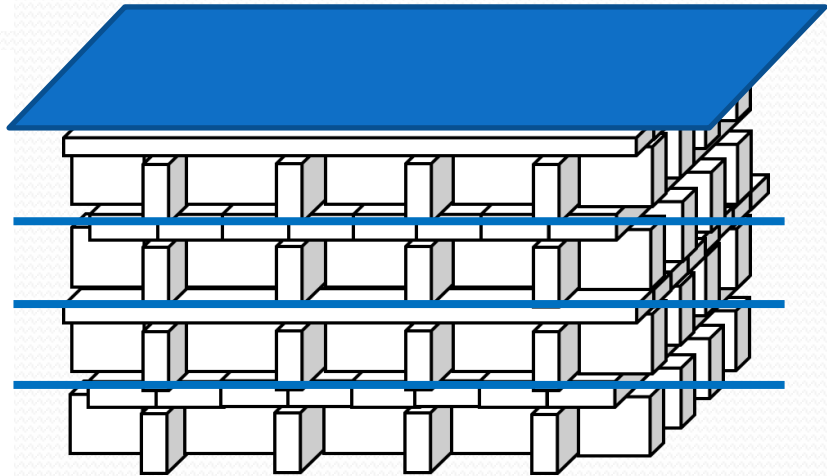
その他
w/ slit



cut

◎赤い部分はクロストークの分だけ平均光量が下がった！

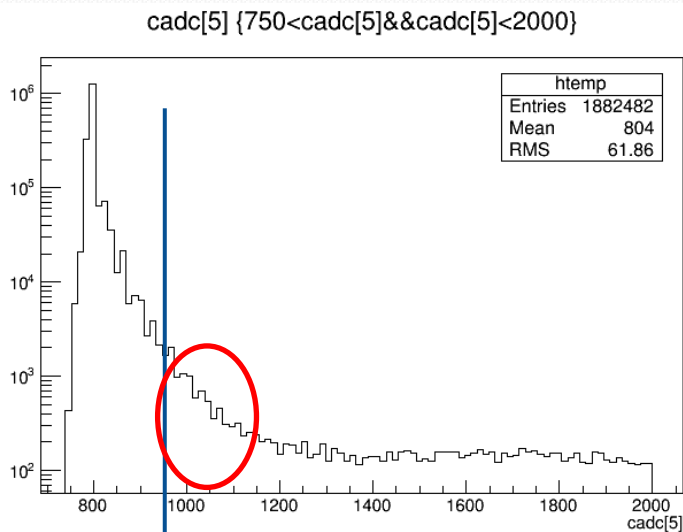
- 1台目は黒塗料を塗布していない (ブラックシートのみ)
- 密接しているグリッド層 (w/ slit) にクロストークがのった



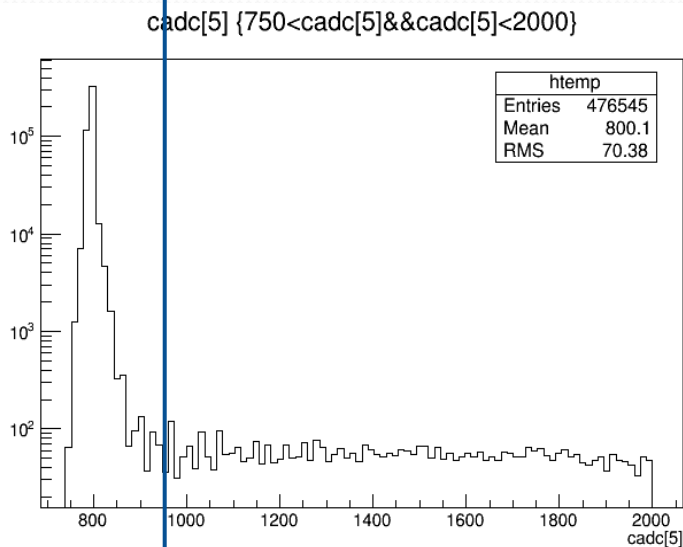
ブラックシートは
w/ slit の上面 と w/o の下面
の間のみ

INGRID Water Module の 光量測定

1台目
w/ slit



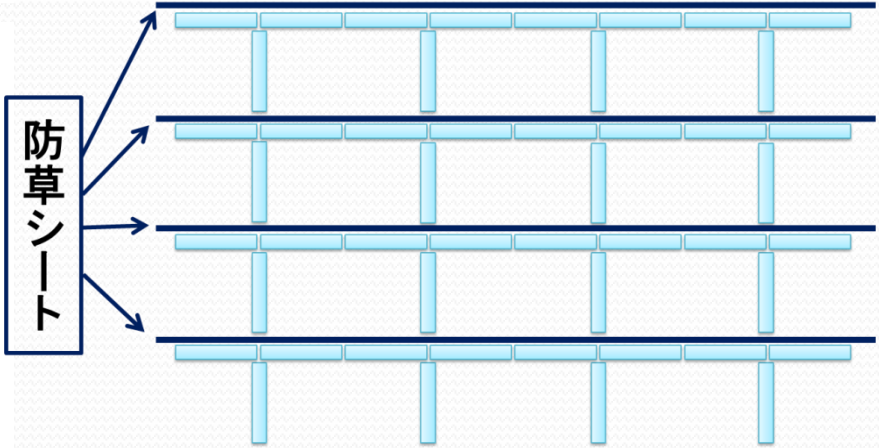
その他
w/ slit



cut

◎赤い部分はクロストークの分だけ平均光量が下がった！

- 1台目は黒塗料を塗布していない (ブラックシートのみ)
- 密接しているグリッド層 (w/ slit) にクロストークがのった



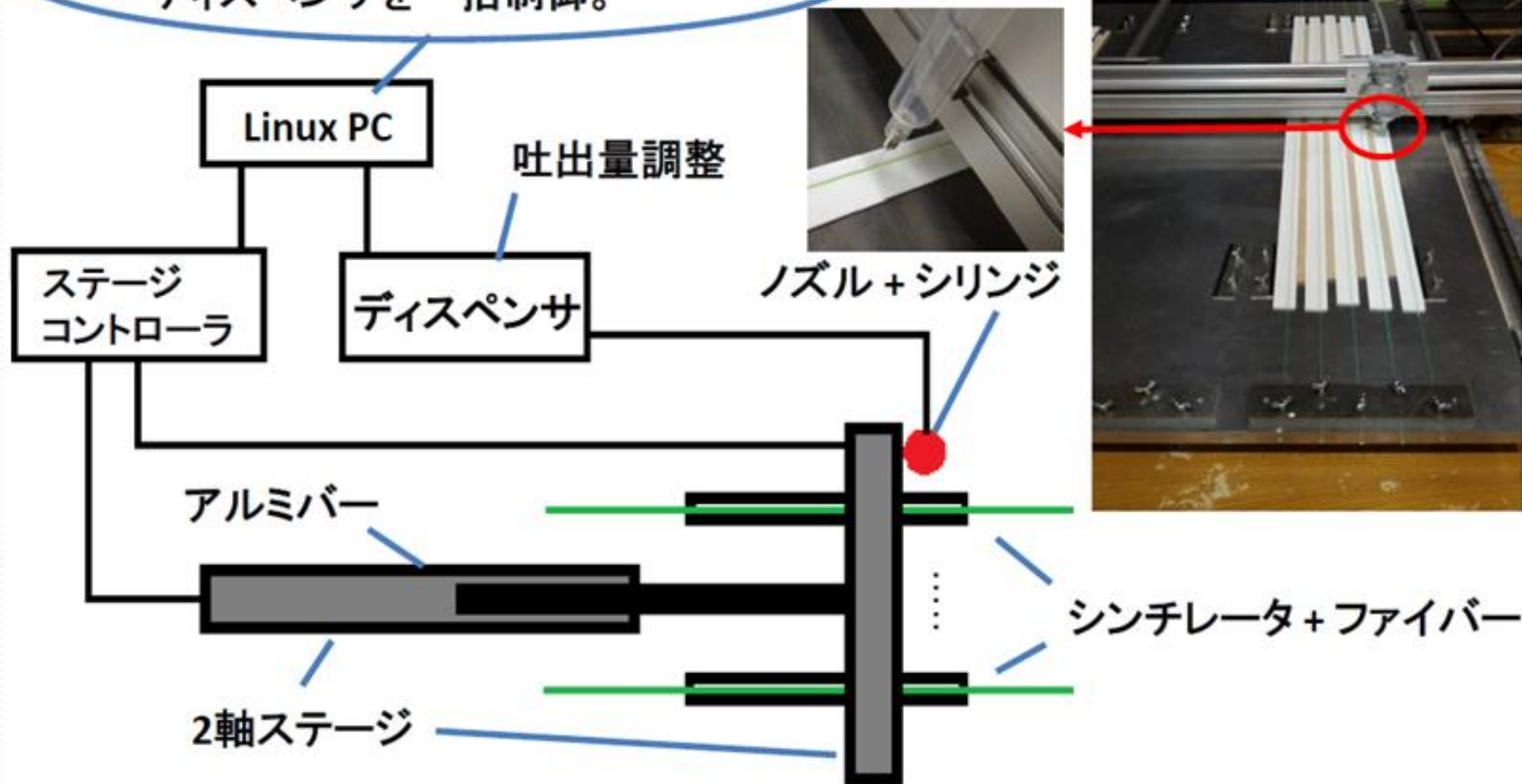
ブラックシートは
w/ slit の上面 と w/o の下面
の間のみ

シンチレーター - ファイバー接着



シンチレータ - ファイバー接着

シェルスクリプトでコントローラと
ディスペンサを一括制御。



[システムを上から見た図]

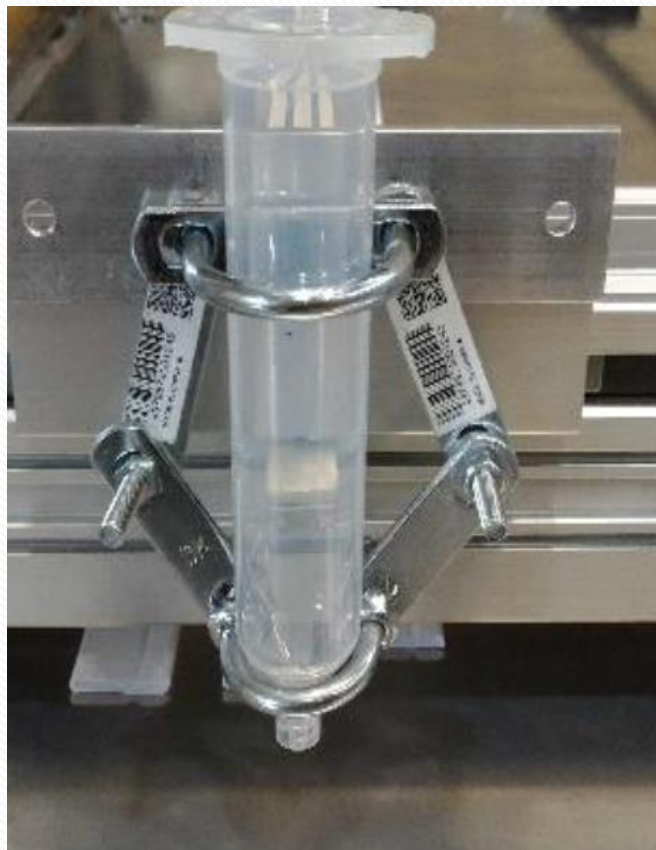
接着システムのアップグレード

<旧型>

- ノズルの先の調節が困難
- セメントの塗布量を多くして接着
- ⇒ ファイバーの浮きやすい

<新型>

- XYステージで微調節が可能
- 適切なセメントの量
- ⇒ ファイバーが浮きにくい



アップグレード前



アップグレード後



XYステージ

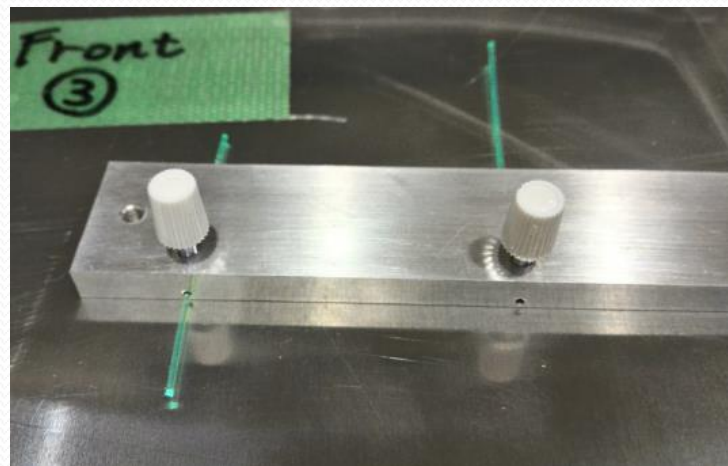
接着システムのアップグレード

<旧型>

5本のシンチレータをまとめて固定
⇒ サイクルごとに位置がずれる

<新型>

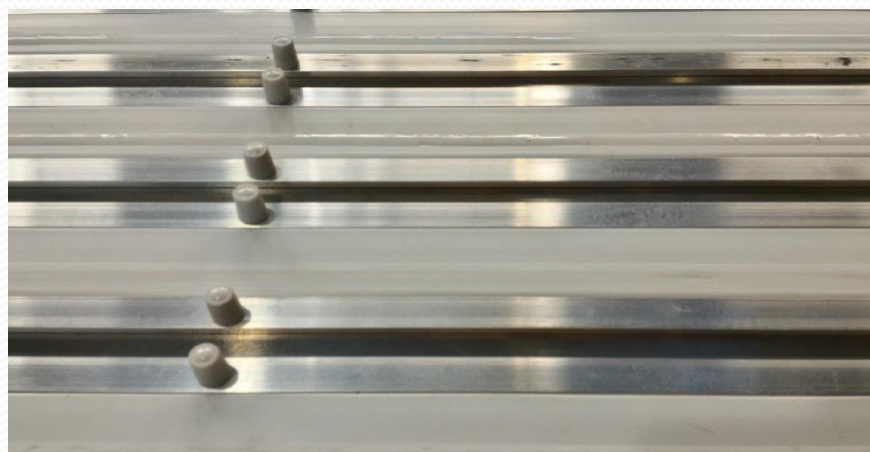
1本ずつ両側からアルミ板で固定
⇒ シンチレータに応じて位置調節可能



↑ ファイバー固定部



アップグレード前

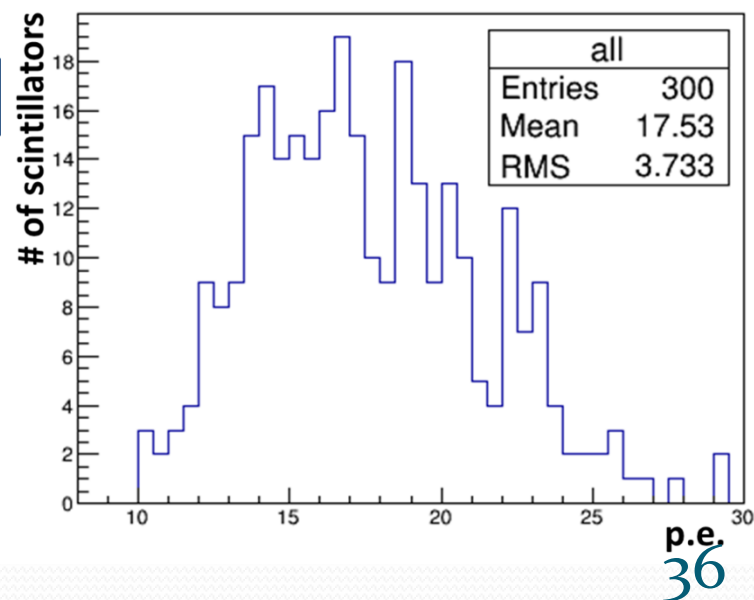
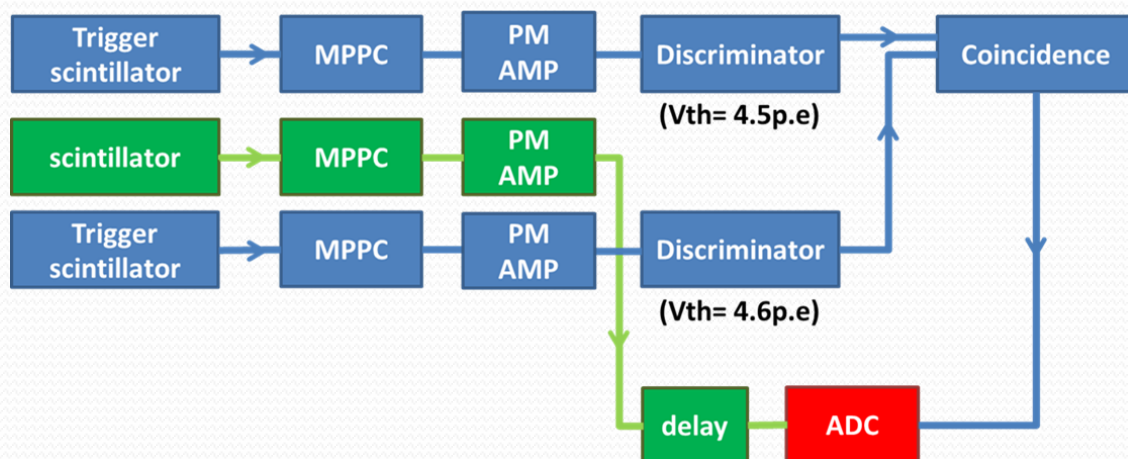


アップグレード後

2台目の水モジュールの製作にむけて

<製作過程におけるサンプリング測定>

- 現在、シンチレータ-ファイバー接着作業を終了
- サンプリングを用いた光量測定
→全体の20% (300本/1500本)
- シンチレータ-ファイバー接着システムのアップグレードにより、ファイバーの浮きを抑制



サンプリングによる光量測定の実現性

- NIM・CAMACなどの問題？

→ GOMIコネクタの抜き差しなしで同じ測定を繰り返す。

3%の実現性 (400 events × 4回測定)

- 暗箱の蓋の開け閉め

3%の実現性 (400 events × 4回測定)

- シンチの重ね方 (取り崩し & 組み立て)

→ GOMIコネクタを外さず、重なったシンチを解体 & 組み立てを行い測定。

8.3%の実現性 (400 events × 3回測定) ← 手間のかからないこちらを採用

→ 固定具を用いると

5.8%の実現性 (400 events × 6回測定)

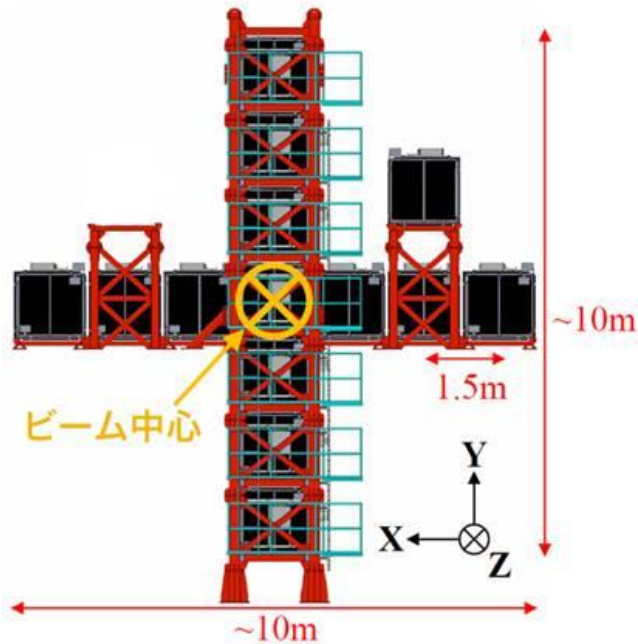
- GOMIコネクタの抜き差し

5%の影響 (by 吉田さんの修論)

- GOMIコネクタ端面の研磨

3%の実現性 (400 events × 2回測定) ← 統計が少ないのでもう少しやるべき？

INGRID



- 鉄とシンチレータのサンドウィッチ構造
- 大きさ $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 0.9\text{ m}$
- 重さ 7 t
- 鉄 6.5 cm の厚さ 9 枚
- プラスチックシンチレータ 11 層

